

Title	Low Cycle Fatigue Under Multi-axial Stress Condition From Structural Aspects(Abstract_要旨)
Author(s)	Mizuhata, Koji
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1969-07-23
URL	http://hdl.handle.net/2433/213187
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	none

氏 名	水 畑 耕 治
	みず はた こう じ
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	論 工 博 第 297 号
学 位 授 与 の 日 付	昭 和 44 年 7 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	Low Cycle Fatigue Under Multi-axial Stress Conditions From Structural Aspects (構造的見地からみた多軸応力下の低サイクル疲労)

論文調査委員 (主 査)
教 授 小 堀 鐸 二 教 授 金 多 潔 教 授 南 井 良 一 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、多軸応力下の低サイクル疲労に関する研究の一環として、構造用アルミニウム合金 7075-T6 を用いた円管に軸引張圧縮と繰返し捩りを種々の歪比や位相差をもって加えて実験的ならびに理論的に研究し、さらに、多軸応力下も含めた一般的な低サイクル疲労の理論が建築耐震構造学にどのように応用し得るかについて考察したものである。

第一章においては、本論文で取り扱われる問題の概要、起源、意義、特徴等についてのべている。金属材料の疲労の問題は弾性範囲については古くから取り扱われていたが、動的な外乱を受ける靱性構造物の最小重量設計や終局設計の問題に関連して、塑性域に入る大きな応力や歪に対してもその破壊機構と破壊の尺度を明らかにする必要が生じた。建築物についても地震や台風のような大きな動荷重をうける際の終局安全性の問題を明確にするためには、多軸応力下で比較的小数の大振幅の繰返しによる低サイクル疲労破壊の尺度と規範を明らかにし、それに基づいて安全性を検討しなければならない。一軸応力下の低サイクル疲労に関しては、1953年に Manson が塑性歪幅と破壊までの繰返し数との間に両対数方眼紙上において直線関数があることを示して以来、多数の研究がなされて大筋は確立されているが、多軸応力下の疲労に関してはごく少数の実験がなされているにすぎないし、さらに多軸応力が位相差をもって加わる場合についての研究はほとんど行なわれていない。また、建築構造物の終局状態における耐震安全性の尺度を明らかにするためには、多軸応力下のランダム低サイクル疲労の立場から研究を行なう必要がある。本研究の意義はこれらの点にある。

第二章においては、過去における低サイクル疲労に関する研究（とくに多軸応力下の場合）を回顧検討し、本研究が低サイクル疲労に関するすべての研究の中でどのような位置を占めているかをのべている。過去における低サイクル疲労に関する研究において取り扱われた問題を分類すればつぎのようになる。(1) 一連の荷重による累積損傷、(2) 平均応力および平均歪の影響、(3) 多軸応力状態の影響、(4) 温度や繰返し速度の影響、(5) 繰返し中における材料の力学的性質の変化、(6) 応力集中の影響、(7) 大き

さの効果、(8) 荷重の波形の影響等。そのうち、多軸応力下の低サイクル疲労に関する研究においてはつぎの問題点があった。(1) ボアソン比の変化の影響、(2) 位相差の影響、(3) 平均歪の影響、(4) 熱疲労の問題、(5) 応力制御試験と歪制御試験の比較、(6) 実用設計への応用に直接関連する問題等。また、多軸応力下の低サイクル疲労に関する研究を実験方法によって分類すれば、(1) 繰返し振りまたは組み合わせ軸引張圧縮繰返し振り疲労試験、(2) 薄板を曲げることにより試験片中央表面付近に応力比がほぼ 2 : 1 の 2 軸応力状態を作り出す方法、(3) 周辺が単純支持された円板長円板または長方形板の両面から交互に油圧を加えることにより試験片中心付近の表面にほぼ様な 2 軸応力状態を作り出す方法、(4) 菱形板試験片を鞍状に曲げ試験片表面全体にわたりほぼ様な二軸応力状態を作り出す方法、(5) 薄肉円筒試験片に内圧と軸引張圧縮える方法等となり、二軸応力状態が大半を占めている。これらの実験の占める領域を二つの主歪を縦横座標にとった平面上で考察すれば、同位相の組み合わせ軸引張圧縮繰返し振り両振疲労試験の領域は、ボアソン比を 0.5 と仮定すれば、勾配が -1 と -0.5 の直線に囲まれる領域となるが、この領域は任意の 2 主歪の互換性から、対応する領域を全平面の上にもつので、この疲労試験の一般性が認められる。

第三章においては、組み合わせ軸引張圧縮繰返し振り低サイクル疲労の実験について詳しくのべている。材料にはアルミニウム合金 7075-T6 を用いたが、これは準靱性の構造用材料で面心立方晶系に属している。試験片の形は外径 1.1 インチ、厚さ 0.05 インチ、ゲージ長 1 インチの円管であるが、厚さ方向の応力勾配が無視でき、また、静的には局部座屈がおこらないように選ばれた。多軸応力下の低サイクル疲労の実験を行なうには大抵の場合既製の試験機は存在しないので、本研究においても新たに試験機が設計製作された。この試験機は電気油圧式サーボ機構を利用したもので、機械部分、電気部分油圧部分および計測部分から成っており、入力電気信号に従って引張圧縮と繰返し振りが独立に種々の歪比と位相差をもって試験片に加わるように設計されている。歪速度は地震を対象として毎分 8 回としたが、これはこの試験機の利得平坦かつ位相差 0° の範囲内にある。また、この歪速度では材料の力学的性質に変化はない。実験はつぎの 76 個の試験から成っている。(1) 引張試験、1 個、(2) 軸引張圧縮疲労試験、21 個、(3) 振り試験、2 個、(4) 繰返し振り疲労試験、19 個、(5) 組み合わせ引張り振り静的試験、歪比 (剪断歪と軸方向歪の比) 2、位相差 0° 1 個、(6) 組み合わせ軸引張圧縮繰返し振り疲労試験、歪比 2、位相差 0° 、8 個、(7) 同静的試験、歪比 1、位相差 0° 、1 個、(8) 同疲労試験、歪比 1、位相差 0° 、3 個、(9) 同静的試験、歪比 3、位相差 0° 、1 個、(10) 同疲労試験、歪比 3、位相差 0° 、3 個、(11) 同疲労試験、歪比 2、位相差 90° 、8 個、(12) 同疲労試験、歪比 2、位相差 45° 、8 個。負荷は変位制御により、平均歪は 0 のみとしている。履歴消費エネルギーを知るために代表的な試験については、応力はロードセルにより、歪は試験片にはりつけた歪ゲージまたはエクステンソメータによって、時間に対して連続的に測定記録している。破壊は応力の急減によって決定している。なお、実験は室温で行なっている。破壊に至る繰返し数は $\frac{1}{4}$ (静的試験) から約 2,000 回とし、その間から 4 または 5 個の歪幅を選んで実験している。組み合わせ試験に対しては歪比 2 を標準としている。

第四章においては、第三章にのべた実験の結果を解析し検討している。上記の各種の実験および既往の同材料の多軸応力下の低サイクル疲労試験を総合的に比較するために、八面体剪断歪幅をすべての実験に

について計算し、破壊までの繰返し数に対して両対数方眼紙にプロットしている。上記の(1)(2)(3)(4)の実験については、真軸方向歪幅または剪断歪幅と破壊までの繰返し数の関係について、既往の資料と比較するととどめているが、その他の場合については、代表的なものについて引張圧縮および捩りの履歴曲線の面積を求めて、これから履歴消費エネルギーを算出し、しかる後、このエネルギーと破壊までの繰返し数との関係をプロットしている。また、(1)~(6)については最大主歪幅と破壊までの繰返し数との関係もプロットしている。以上のようにして実験結果を整理した結果、つぎの事項が結論されている。(1) 軸引張圧縮疲労試験については、真軸方向歪幅と破壊までの繰返し数の間に、勾配0.24、截片0.10の直線、また、繰返し捩り疲労試験については、剪断歪幅と破壊までの繰返し数の間に、勾配0.34、截片0.32の直線、また、同位相の組合わせ軸引張圧縮繰返し捩り疲労試験については、八面体剪断歪幅と破壊までの繰返し数の間に、勾配0.23、截片0.13の直線が両対数方眼紙上に得られた。しかし、これらの直線の勾配は Coffin 等によって得られた勾配に比べてかなりゆるい。これは、本研究においては繰返し中に座屈モードが現われたのに平均的な歪を測ったためであると推論している。(2) 八面体剪断歪説を用いると同位相の組み合わせ試験においては歪比の影響はほとんど認められない。(3) 位相差のある場合を除くすべての試験に対して、八面体剪断歪幅と破壊までの繰返し数の間には勾配0.26、截片0.16の直線関係があるが約100回以上の繰返し数に対しては、この直線からの偏差は小さいけれども、約100回以下の繰返し数に対しては、破壊の機構が複雑になるためこの直線からの偏差は大きい。(4) 繰返し捩り疲労試験に対する勾配は長円板の曲げや菱形板の鞍状曲げの疲労試験に対する勾配とほぼ一致しているが、他の場合よりもやや急である。(5) 位相差のある場合には、上にのべたようにして求めた八面体剪断歪幅を縦軸にとっても、位相差 45° に対する八面体剪断歪幅と破壊までの繰返し数との関係を示す直線は同位相に対する直線より下にあり、位相差 90° に対する直線は 45° に対する直線より下になる。しかし、履歴消費エネルギーを縦軸にとれば位相差の影響は小さくなる。(6) 破断線は、軸引張圧縮に対しては輪状であり、繰返し捩りに対しては軸方向に現われ、同位相の組み合わせ軸引張圧縮繰返し捩りに対しては前二者の間になる。位相差のある場合はジグザグに亀裂が入る。

第五章においては、上にのべた多軸応力状態も含めた一般の低サイクル疲労の理論が、どのように建築耐震構造学に応用し得るかを考察している。建築構造物が激震をうける場合には少数の大応力の繰返しに対して安全性を確保する必要があり、つぎのような仮定のもとにランダム荷重をうける低サイクル疲労の理論を適用することができ、単純引張試験あるいは定振幅疲労試験から破壊までの全繰返し数が予測できることを示している。(1) Palmgren-Miner の線型損傷説が成立する。(2) 繰返し中応力歪履歴曲線は安定である。(3) 多軸応力が加わる場合には八面体剪断歪説にしたがって破壊する。(4) 繰返し荷重速度と温度の影響が小さい。(5) 荷重は定常ランダム過程である。

最後に、第六章においては、本論文の要約と結論をのべ、近い将来になされるべき研究が指摘されている。

論文審査の結果の要旨

本論文で取り扱われている問題は次の二つに大別される。一つは構造材料学の分野における多軸応力下の低サイクル疲労の問題であり、他の一つは建築耐震構造学への低サイクル疲労の理論および実験結果の応用の問題である。疲労の問題は前世紀から材料学の分野で発展して来たが、低応力の高サイクル数範囲

の研究が多く、高応力の低サイクル疲労が取り扱われるようになったのは比較的新しい。とくに多軸応力下の疲労に関してはごく少数の研究がなされているにすぎない。これは理論的ならびに実験的困難さによるところが多い。

まして位相差をもって二種以上の荷重が加わる場合には、その困難さは更に大きくなる。本研究の材料学的価値はこれらの困難を克服して一応の成果を挙げているところにある。

一方、建築耐震構造学の分野では、以前から繰り返し载荷の場合についての研究が行なわれていたが、やはり大荷重の繰り返しという実験的困難さから、とくに疲労の問題としては取り扱われず、履歴特性の解明に重点が置かれていた。地震時の構造物部材の破壊は複雑な歪状態と履歴過程の影響を受けた材料の劣化に伴なって発生すると考えられるので、ここで取り扱われた多軸応力下の低サイクル疲労に関する研究が構造物の終局耐震安全性の評価に果たす役割は大きいといえる。

本論文において、多軸応力下の低サイクル疲労に関する材料学的研究に関して、著者は種々の歪比や位相差をもつ軸引張圧縮と繰り返し振りをとりあげ、それが他の多軸応力状態と比較してどのような位置づけにあるかをまず考察している。多軸応力下の材料強度を単軸応力下のそれから予測する仮説には、静的な荷重に対して、(1) 最大主歪説、(2) 最大剪断歪説、(3) 八面体剪断歪説等があるが、これらの説がそのまま繰り返し荷重に対しても適用され得るかどうかについては実験的解明が必要である。本研究においては、軸引張圧縮試験から始めて、繰り返し振り試験を経て、種々の歪比や位相差をもつ組み合わせ軸引張圧縮繰り返し振り疲労試験を行ない、位相差がなければ歪比を種々に変化させても八面体剪断歪説がもっともよい予測を与え、八面体剪断歪幅と破壊までの繰り返し数の間に両対数方眼紙上で直線関係にあることが示されている。位相差のある場合には、ピーク値のみを問題とする通常の八面体剪断歪説では予測されず、八面体剪断歪の方向性や時間的経過や履歴消費エネルギーを問題にする考え方がより忠実に説明づけることを指摘している。また、応力歪履歴曲線については、初期の過渡状態をすぎれば破壊直前まで安定であることをのべている。さらに、実験技術の点かみてみても、本研究において電気油圧式サーボ機構を利用した試験機がこのような組み合わせ応力下の低サイクル疲労の実験用に開発されたことは今後に寄与するところが多い。

一方、耐震構造学的見地に立つ場合、構造物部材は地震時にランダム強制変位を受ける。構造物部材の荷重変形履歴曲線は一般には材料の応力歪履歴曲線と全く同一ではないが、接合部のガタや局部座屈を避けるように構成すれば、この両者に密接な関係が見出され、ある程度まで材料学において展開された考え方が構造物に適用し得るものとしている。つぎに著者は、本実験で得た破壊の尺度として構造物に適用可能な八面体剪断歪による規範と履歴の安定性等の知見に基づいて、線型損傷説を構造物の低サイクル疲労に適用し、定常ランダム過程として地震を受ける靱性金属材料の構造物の寿命を全繰り返し数の形で計算する方式を示し、同時にまた、地震外乱の強度やスペクトルばかりでなく継続時間が重要なパラメータであることを指摘している。

これを要するに本論文は、多軸応力下の低サイクル疲労に関して構造材料学的研究を通じて耐震構造学の分野に新しい知見を提供したものであり、学術上ならびに實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。